



# VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

---

## МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ

«Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»



## ПРИМЕНЕНИЕ СВИ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Пискунов С.А., Мокеев А.В.

24 апреля 2025 г.

г. Чебоксары



## **Актуальность темы исследования:**

- ❑ усложнение конфигурации современных распределительных сетей (РС);
- ❑ развитие сетей с распределенной генерацией;
- ❑ ограничения в эффективности традиционных принципов выполнения защит линий РС;
- ❑ развитие и применение новых технологий и решений в сетях среднего напряжения.

## **Задачи исследования:**

- ❑ анализ характеристик применяемых защит в распределительных сетях;
- ❑ анализ математических моделей линий в синхровекторах процесса;
- ❑ разработка алгоритмов защиты линии от междуфазных КЗ и ОЗЗ на основе СВИ;
- ❑ развитие теории СВИ для целей релейной защиты.

## **Достоверность результатов:**

- ❑ математическое и физическое моделирование;
- ❑ анализ разработанных алгоритмов по данным осциллограмм реальных аварийных событий.



### Таблица 1 Краткое описание принципов выполнения защит линий

Класс напряжения	Особенности	Применяемая РЗА
6-10 кВ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- кабельные и воздушные линии;</li> <li>- радиальное исполнение, одностороннее питание;</li> <li>- изолированная/компенсированная нейтраль;</li> <li>- многофазные КЗ, ОЗЗ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- токовая релейная защита;</li> <li>- АВР, АПВ ВЛ (реже – КЛ);</li> <li>- дальней резервирование.</li> </ul>
20-35 кВ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- кабельные и воздушные линии;</li> <li>- кольцевая конфигурация, параллельные цепи;</li> <li>- изолированная/компенсированная нейтраль;</li> <li>- многофазные КЗ, ОЗЗ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- токовая защита для одиночных и тупиковых линий;</li> <li>- дистанционные защиты;</li> <li>- поперечные дифференциальные защиты.</li> </ul>
110-220 кВ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- преимущественно воздушные линии;</li> <li>- глухое/эффективное заземление нейтрали;</li> <li>- однофазные и многофазные КЗ;</li> <li>- транзит мощности между энергосистемами.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- дистанционные защиты, блокировка от качаний;</li> <li>- ТЗНП от однофазных КЗ, направленные ВЧ защиты;</li> <li>- дифференциальные защиты;</li> <li>- ближнее и дальней резервирование.</li> </ul>



Рис.1 – Относительная зона действия ТО ВЛ 35 кВ

$$k = \frac{I_{к.мах}^{(3)}}{I_{к.мин}^{(2)}}$$

□ 6-35 кВ k = 1,15 – 2,8

□ 110-220 кВ k = 1,15 – 6,2

#### Ссылки:

Федосеев, А.М. Релейная защита электроэнергетических систем: учебник для вузов / А.М. Федосеев, М.А. Федосеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с.

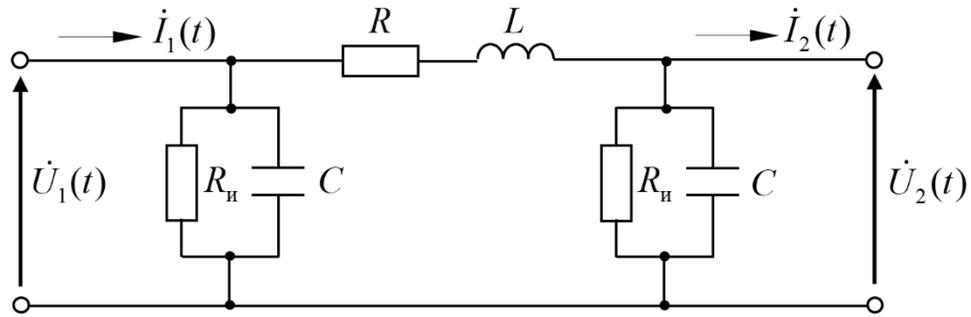


Рис.2 – Нормальный режим работы

$$\begin{cases} R(\dot{I}_1(t) - C\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - C\dot{V}''_1(t)) = \Delta\dot{U}(t) \\ R(\dot{I}_2(t) + C\dot{V}'_2(t)) + L(\dot{J}'_2(t) - C\dot{V}''_2(t)) = \Delta\dot{U}(t) \end{cases} \quad (1)$$

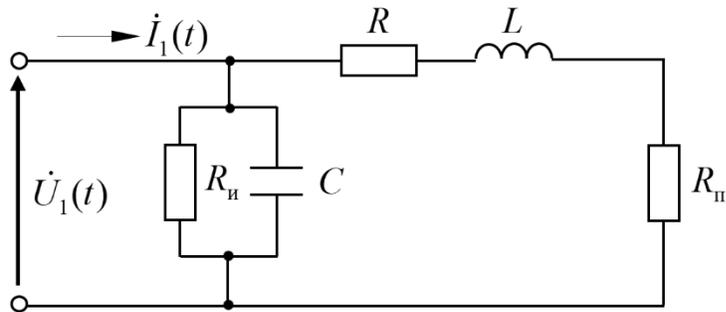


Рис.3 – Односторонние измерения при КЗ

$$(R + R_n)(\dot{I}_1(t) - C\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - C\dot{V}''_1(t)) = \dot{U}_1(t) \quad (2)$$

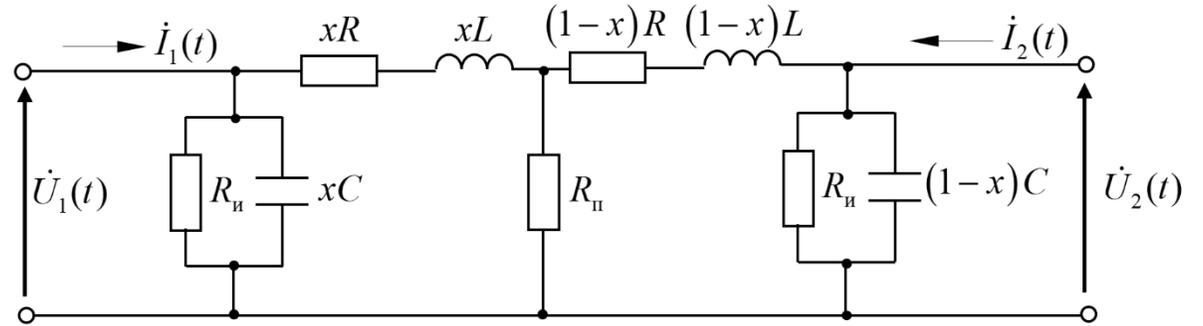


Рис.4 – Двухсторонние измерения при КЗ

$$\begin{aligned} & x \left[ R(\dot{I}_1(t) - xC\dot{V}'_1(t)) + L(\dot{J}'_1(t) - xC\dot{V}''_1(t)) \right] - \\ & - (1-x) \left[ R(\dot{I}_2(t) - (1-x)C\dot{V}'_2(t)) + L(\dot{J}'_2(t) - (1-x)C\dot{V}''_2(t)) \right] = \Delta\dot{U}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

### Обозначения:

$$\begin{aligned} \Delta\dot{U}(t) &= \dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t), \\ \dot{X}'(t) &= \frac{d\dot{X}(t)}{dt}, \quad \dot{X}''(t) = \frac{d^2\dot{X}(t)}{dt^2}, \\ \dot{V}'(t) &= \dot{U}'(t) + j\omega_0\dot{U}(t), \\ \dot{J}'(t) &= \dot{I}'(t) + j\omega_0\dot{I}(t), \\ \dot{V}''(t) &= \dot{U}''(t) + j2\omega_0\dot{U}'(t) - \omega_0^2\dot{U}(t), \\ \dot{J}''(t) &= \dot{I}''(t) + j2\omega_0\dot{I}'(t) - \omega_0^2\dot{I}(t). \end{aligned}$$

### Применение:

- (1) → СВЛ, оценка R, L, C;
- (2) → ДЗ-1 линии, ОМП;
- (3) → ДЗ-2 линии, ОМП.



Таблица 2 Варианты оценки сопротивления линии

Тип	Характеристика	Выражение
Традиционный способ	- оценка сопротивления линии в установившемся режиме.	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t)}$ <span style="float: right;"><math> \hat{z}_r(t) </math></span>
Разработанный способ	- установившийся режим; - э/м и э/мех процессы в энергосистеме; - введение коэффициента $\underline{k}$ ;	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t)}, k = \frac{L_{yд}}{Z_{yд}}$ <span style="float: right;"><math> \hat{z}_{p1}(t) </math></span>
	- установившийся режим; - э/м и э/мех процессы в энергосистеме; - введение коэффициента $\underline{k}$ ; - с учетом емкости линии.	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \underline{k}\dot{I}'_1(t) - C(k\underline{U}_1''(t) + (1 + jk\underline{\omega}_0)\dot{U}'_1(t) + j\underline{\omega}_0\underline{U}_1(t))}$ <span style="float: right;"><math> \hat{z}_{p2}(t) </math></span>
	- установившийся режим; - э/м и э/мех процессы в энергосистеме; - независимая оценка $R, L$ ; - с учетом емкости линии.	$\dot{K}(t) = \dot{I}_1(t) - C\dot{V}'_1(t), \dot{M}(t) = \dot{J}'_1(t) - C\dot{V}''_1(t),$ $\hat{R}(t) = \frac{\Delta\dot{U}_{Im}(t)\dot{M}_{Re}(t) - \Delta\dot{U}_{Re}(t)\dot{M}_{Im}(t)}{\dot{K}_{Im}(t)\dot{M}_{Re}(t) - \dot{K}_{Re}(t)\dot{M}_{Im}(t)}, \hat{L}(t) = \frac{\Delta\dot{U}_{Re}(t)}{\dot{M}_{Re}(t)} - \hat{R}(t) \cdot \frac{\dot{K}_{Re}(t)}{\dot{M}_{Re}(t)}$

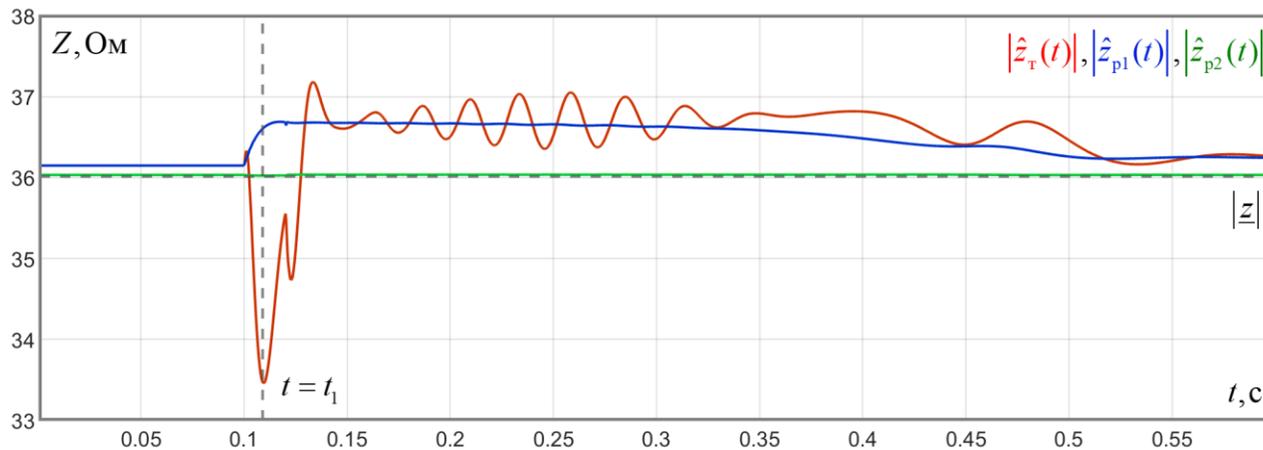


Рис.5 – Оценка  $\underline{z}$  при э/мех процессе в ЭС

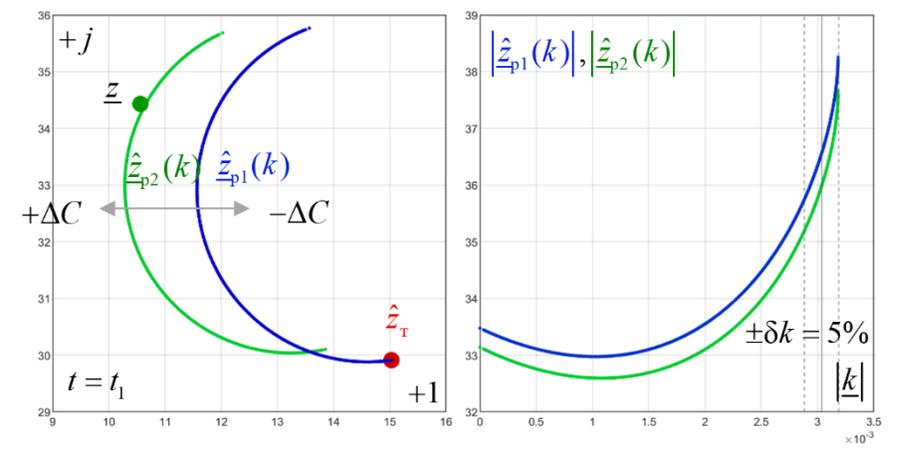


Рис.6 – Изменение коэффициента  $\underline{k}$



**Таблица 3 Варианты оценки сопротивления петли КЗ**

Тип	Характеристика	Выражение
Традиционный способ	- любая ступень ДЗ; - влияние э/м и э/мех процессов в ЭС; - влияние фильтра.	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t)}$ <span style="color: red;"><math> \hat{z}_1(t) </math></span>
Разработанный способ	- любая ступень ДЗ; - введение коэффициента $\underline{k}$ ; - учет влияния фильтра; - снижение влияния э/м процессов;	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t) + \underline{k}\dot{I}'_p(t)}$ <span style="color: blue;"><math> \hat{z}_{p1}(t) </math></span>
	- любая ступень ДЗ; - независимая оценка $R, L$ ; - учет влияния фильтра; - снижение влияния э/м процессов;	$\hat{R}(t) = \frac{U_{pRe}(t) - \hat{L}(t)(I'_{pRe}(t) - \omega_0 \dot{I}_{pIm}(t))}{I_{pRe}(t)}$ $\hat{L}(t) = \frac{U_{pIm}(t)I_{pRe}(t) - U_{pRe}(t)I_{pIm}(t)}{\omega_0(I_{pRe}^2(t) + I_{pIm}^2(t)) + I'_{pIm}(t)I_{pRe}(t) - I'_{pRe}(t)I_{pIm}(t)}$
	- I ступень ДЗ (ускорение); - введение коэффициента $\underline{k}$ ; - учет влияния фильтра; - снижение влияния э/м процессов;	$\hat{z}(t) = \frac{1}{\underline{k}\omega_0} \text{Im} \left( \frac{\dot{U}_p(t)}{\dot{I}_p(t) + \underline{k}\dot{I}'_p(t)} \right)$ <span style="color: green;"><math> \hat{z}_{p2}(t) </math></span>

$$\dot{U}_p(t) = \begin{bmatrix} \dot{U}_a(t) - \dot{U}_b(t) \\ \dot{U}_b(t) - \dot{U}_c(t) \\ \dot{U}_c(t) - \dot{U}_a(t) \\ \dot{U}_a(t) \\ \dot{U}_b(t) \\ \dot{U}_c(t) \end{bmatrix},$$

$$\dot{I}_p(t) = \begin{bmatrix} \dot{I}_a(t) - \dot{I}_b(t) \\ \dot{I}_b(t) - \dot{I}_c(t) \\ \dot{I}_c(t) - \dot{I}_a(t) \\ \dot{I}_{a0}(t) \\ \dot{I}_{b0}(t) \\ \dot{I}_{c0}(t) \end{bmatrix},$$

$$\dot{I}_{\phi 0}(t) = \dot{I}_{\phi}(t) + k_0 \dot{I}_0(t) + k_M \dot{I}_{0\text{оп}}(t),$$

$$k_0 = \frac{z_0 - z_1}{z_1}, k_M = \frac{z_M}{z_1}.$$

## Преимущества:

- существенно снижается влияние фильтра для оценки модуля и фазы синхровектора;
- возможность снизить влияние переходного сопротивления в месте КЗ;
- обеспечивается точная и быстрая оценка сопротивления при КЗ в линии (1 ступень ДЗ).

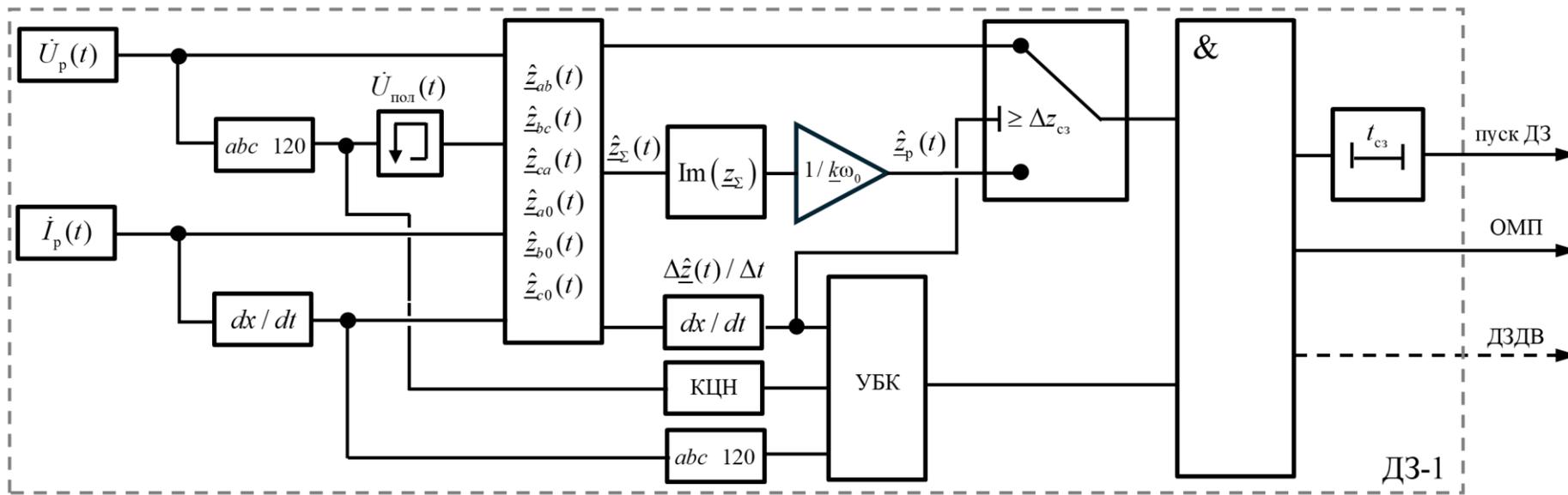


Рис.7 – Структурная схема ДЗ-1 на односторонних измерениях синхровекторов

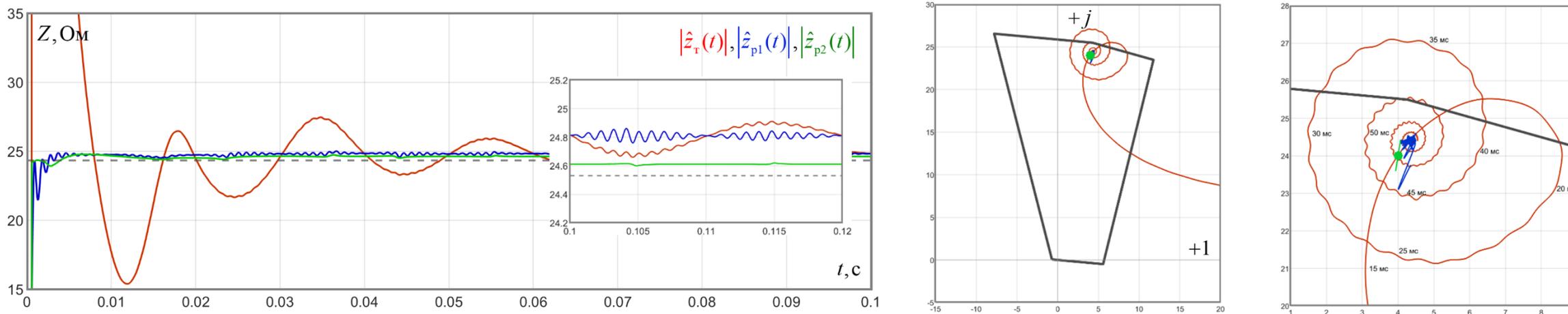


Рис.8 – Оценка сопротивления при включении линии на КЗ при наличии дуги



Таблица 4 Варианты оценки сопротивления петли КЗ

Тип	Характеристика	Выражение
Традиционный способ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- I ступень ДЗ, ОМП;</li> <li>- влияние э/м и э/мех процессов в ЭС;</li> <li>- влияние фильтра.</li> </ul>	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + z\dot{I}_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t)}$ $ \hat{z}_1(t) $
Разработанный способ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- I ступень ДЗ, ОМП;</li> <li>- введение коэффициента <math>\underline{k}</math>;</li> <li>- учет влияния фильтра;</li> <li>- снижение влияния э/м и э/мех процессов;</li> </ul>	$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}_1(t) - \dot{U}_2(t) + z\dot{I}_2(t) + L\dot{I}'_2(t)}{\dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t) + \underline{k}(\dot{I}'_1(t) + \dot{I}'_2(t))}$ $ \hat{z}_{p1}(t) $
	<ul style="list-style-type: none"> <li>I ступень ДЗ, ОМП;</li> <li>- введение коэффициента <math>\underline{k}</math>;</li> <li>- учет влияния фильтра;</li> <li>- снижение влияния э/м и э/мех процессов;</li> <li>- учет емкости линии.</li> </ul>	$\Delta\dot{V}(t) = \dot{V}_1(t) - \dot{V}_2(t), \dot{I}(t) = \dot{I}_1(t) + \dot{I}_2(t), \dot{J}(t) = \dot{J}_1(t) + \dot{J}_2(t),$ $\dot{K}(t) = -C(L\Delta\dot{V}''(t) + R\Delta\dot{V}'(t)), \dot{M}(t) = R\dot{I}(t) + L\dot{J}'(t) - 2C(L\dot{V}_2''(t) + R\dot{V}_2'(t)),$ $\dot{N}(t) = C(L\dot{V}_2''(t) + R\dot{V}_2'(t)) - R\dot{I}_2(t) - L\dot{J}'_2(t) - \Delta\dot{U}(t),$ $\hat{z}(t) = z \left( \frac{-\dot{M}(t) \pm \sqrt{(\dot{M}(t))^2 - 4\dot{K}(t)\dot{N}(t)}}}{2\dot{K}(t)} \right)$ $ \hat{z}_{p2}(t) $

## Преимущества:

- ❑ полное исключение переходного сопротивления в месте КЗ (→ ОМП);
- ❑ снижение влияния начальных условий (предыдущего режима);
- ❑ точная и быстрая оценка сопротивления при э/м и э/мех переходных процессах.

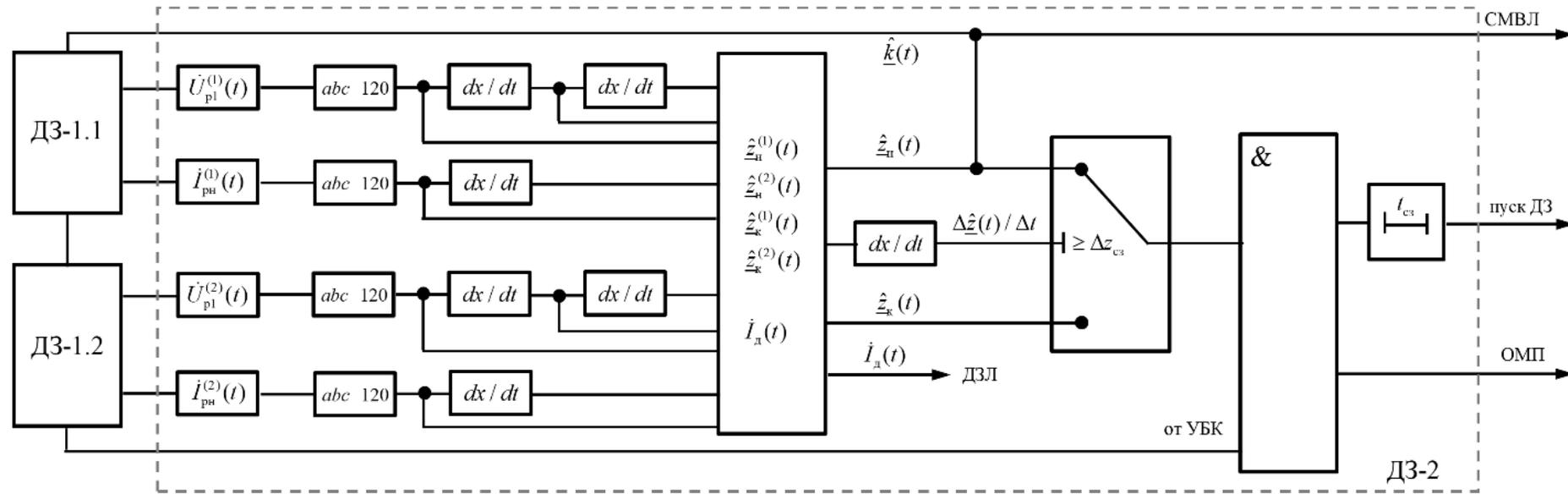


Рис.9 – Структурная схема ДЗ-2 на двухсторонних измерениях синхровекторов

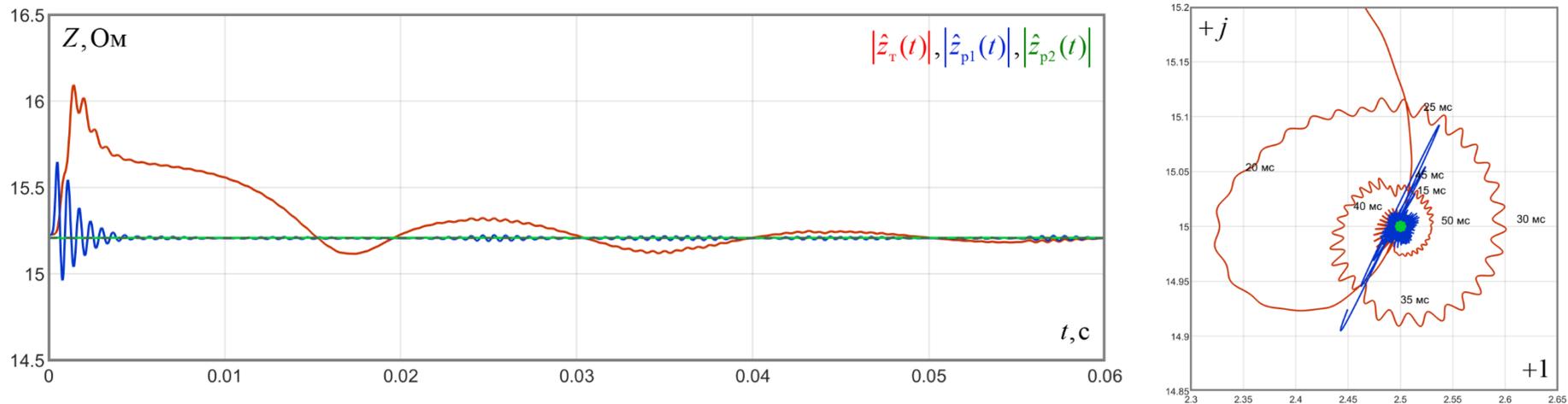


Рис.10 – Оценка сопротивления при КЗ в линии по двухсторонним измерениям

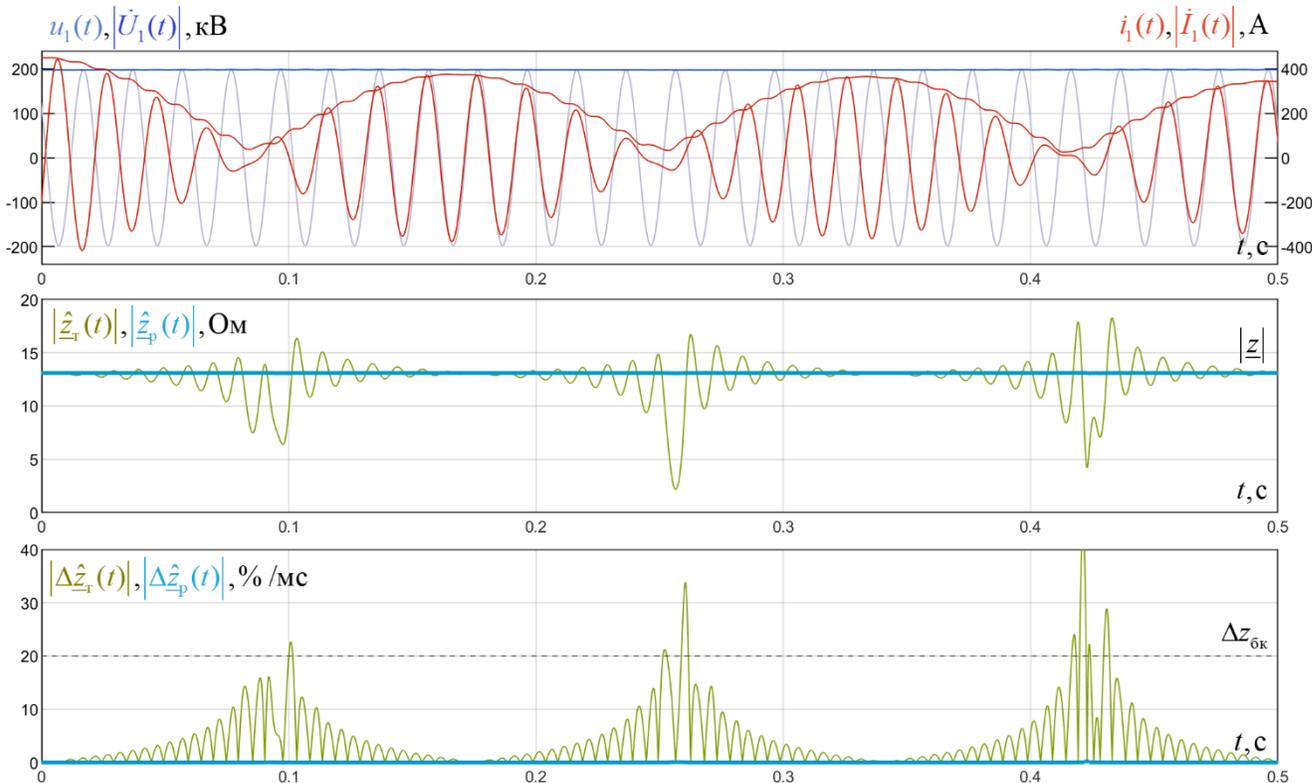


Рис.11 – Качания мощности в энергосистеме

Таблица 5 Максимальные приращения оценки сопротивления

Тип алгоритма	$\Delta Z$		$\Delta^2 Z$	
	Ом/мс	% / мс	Ом/мс <sup>2</sup>	% / мс <sup>2</sup>
традиционный	4,44	33,9	18,2	138,6
разработанный	0,01	0,08	0,14	1,07

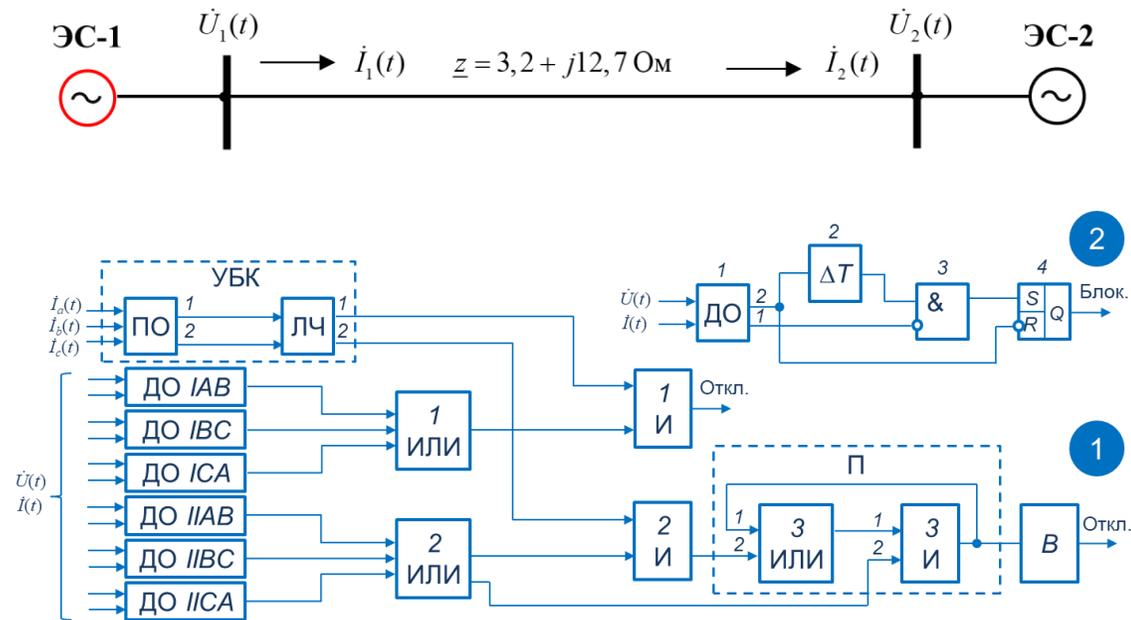


Рис.12 – Алгоритм работы УБК

**Ссылки:**

1. Шнеерсон, Э.М. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.
2. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принцип и область применения. – Перевод с англ. / под ред. Дьякова А.Ф. – М.: Энергоиздат. 2005. – 322 с

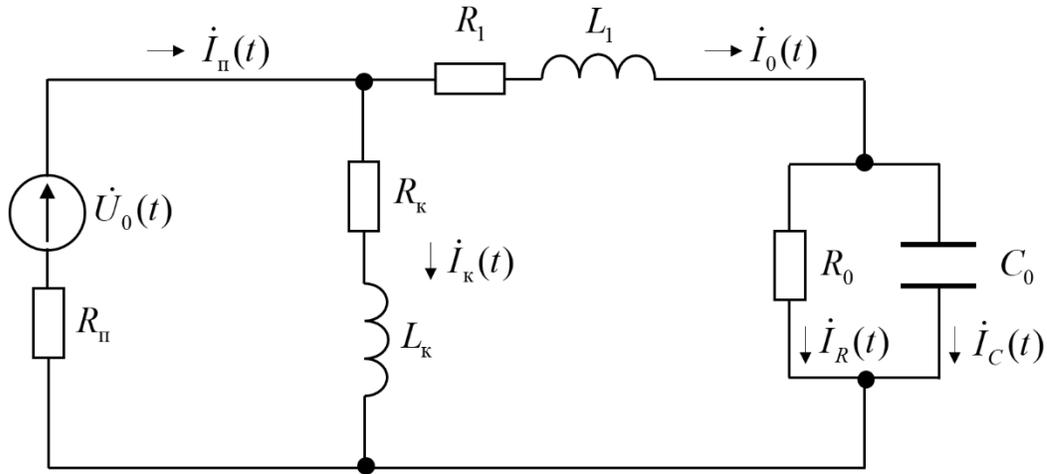


Рис.13 – Схема замещения контура НП

$$\begin{cases} (R_{II} + R_I) \dot{I}_0(t) + L_I \dot{J}'_0(t) + \dot{U}_C(t) = \dot{U}_0(t) \\ C_0 \dot{V}'_C(t) + \frac{1}{R_0} \dot{U}_C(t) = \dot{I}_0(t) \end{cases}$$

(4) → для сети без ДГР

$$\begin{cases} L_I \dot{J}'_1(t) + R_I \dot{I}_0(t) + \dot{U}_C(t) + R_{II} (\dot{I}_0(t) + \dot{I}_K(t)) = \dot{U}_0(t) \\ L_K \dot{J}'_K(t) + R_K \dot{I}_K(t) + R_{II} (\dot{I}_0(t) + \dot{I}_K(t)) = \dot{U}_0(t) \\ C_0 \dot{V}'_C(t) + \frac{1}{R_0} \dot{U}_C(t) = \dot{I}_0(t) \end{cases}$$

(5) → с учетом ДГР

Таблица 6 Варианты оценки емкости фидера при ОЗЗ

Тип	Характеристика	Выражение
Традиционный способ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изолированная нейтраль;</li> <li>- установившийся режим ОЗЗ;</li> </ul>	$\hat{C}_0(t) = \text{Im} \left( \frac{\dot{I}_0(t)}{\omega_0 \dot{U}_0(t)} \right)$
Разработанный способ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изолированная нейтраль;</li> <li>- установившийся и переходный режим ОЗЗ;</li> </ul>	$\hat{C}_0(t) = \frac{\dot{I}_0(t) - G_0 (\dot{U}_0(t) - R_I \dot{I}_0(t) - L_I \dot{J}'_0(t))}{\dot{V}'_0(t) - L_I \dot{J}''_0(t) - (R_I + R_{II}) \dot{J}'_0(t)}, G_0 = \frac{1}{R_0}$
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- изолированная или компенсированная нейтраль;</li> <li>- установившийся и переходный режим ОЗЗ;</li> <li>- эквивалентные синхровекторы гармоник.</li> </ul>	$\hat{C}_0(t) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{I}_{0m}(t) - G_0 (\dot{U}_{0m}(t) - R_I \dot{I}_{0m}(t) - L_I \dot{J}'_{0m}(t)))}{\sum_{n=1}^{N_{\max}} (\dot{V}'_{0m}(t) - L_I \dot{J}''_{0m}(t) - (R_I + R_{II}) \dot{J}'_{0m}(t))}, m = 2n + 1$

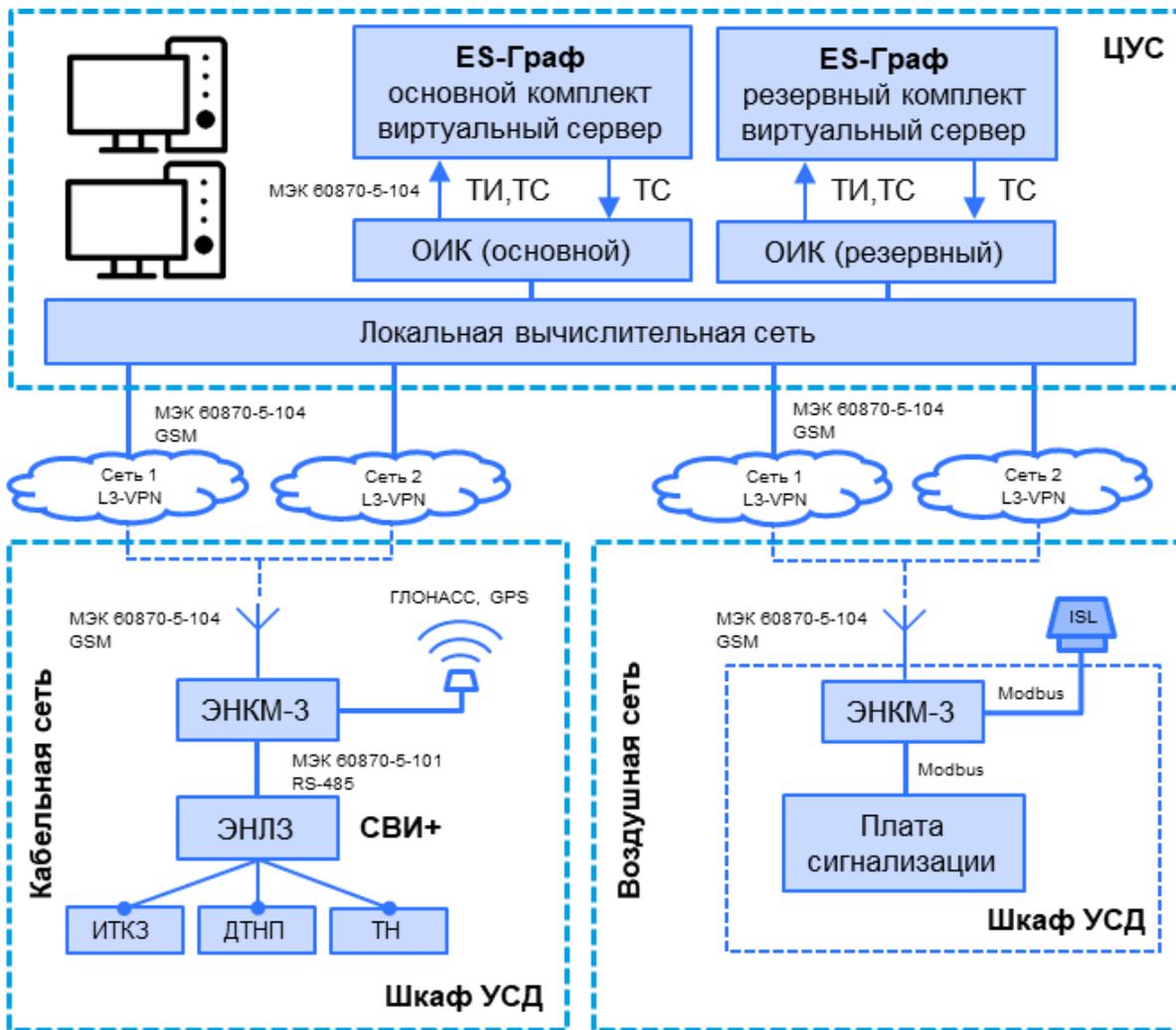


Рис.14 – Структурная схема системы локализации ОЗЗ на основе СВИ



Рис.15 – Оборудование системы локализации ОЗЗ

## Разработка:

- эквивалентные синхровекторы гармоник;
- импульсный принцип защиты от ОЗЗ

## Ссылки:

1. Лачугин, В. Ф., Иванов А.А., Белянин А.А. Разработка импульсных защит от замыканий на землю. Релейная защита и автоматизация. № 3(8) 2012, с. 50-58.
2. Шуин В.А., Мартынов В.Л., Шагурина Е.С., Шадрикова Т.Ю. Максимальные токовые защиты от замыканий на землю на основе высших гармоник для компенсированных кабельных сетей 6-10 кВ. Электротехника. № 1, 2018, с. 62-72.

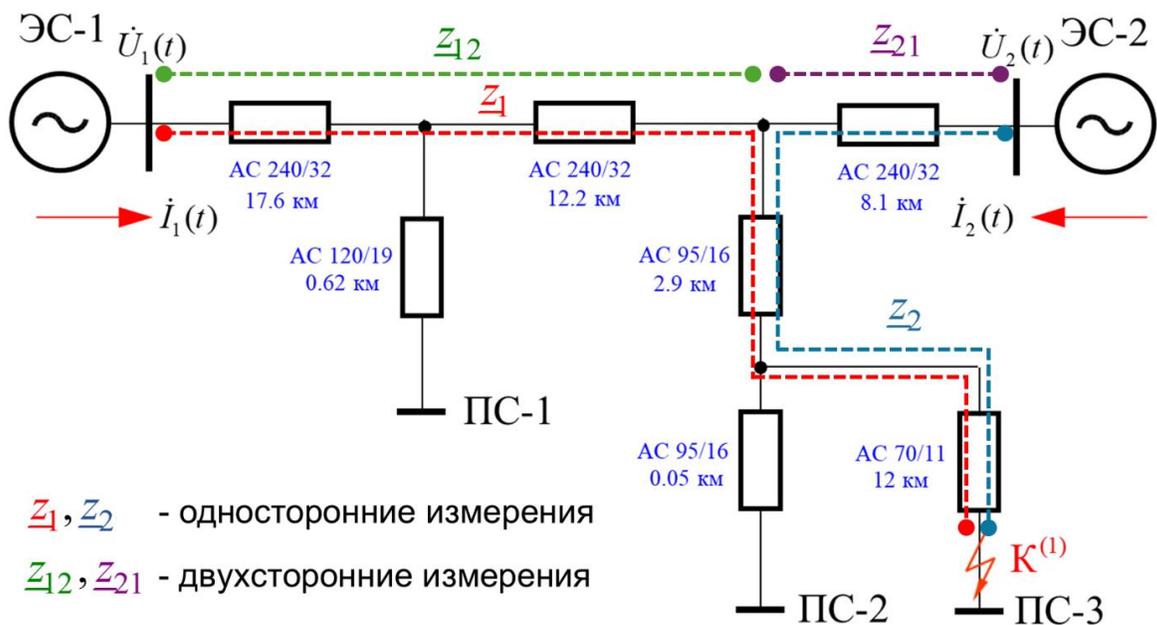


Рис.16 – Структурная схема сети (пример № 1)

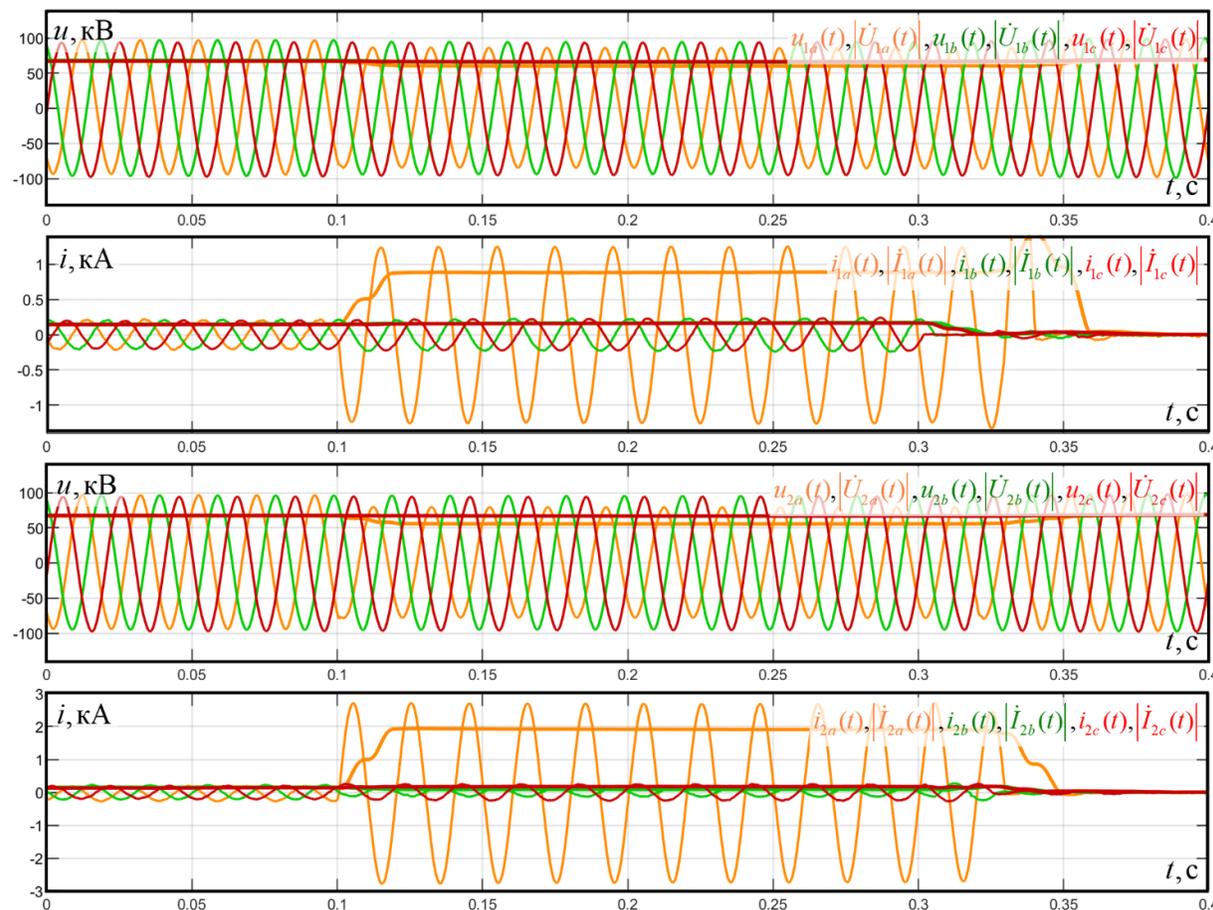


Рис.17 – Осциллограммы напряжений и токов

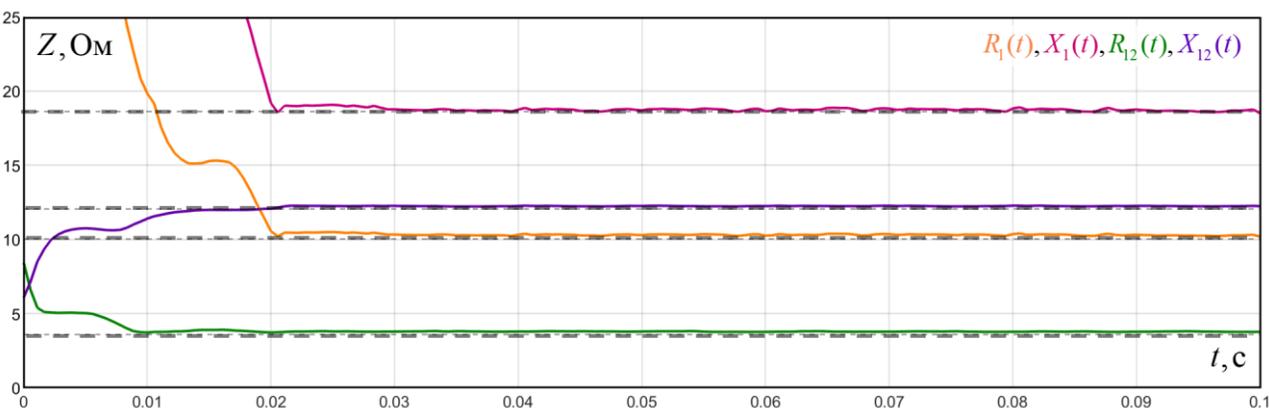


Рис.18 – Оценка сопротивления на основе СВИ

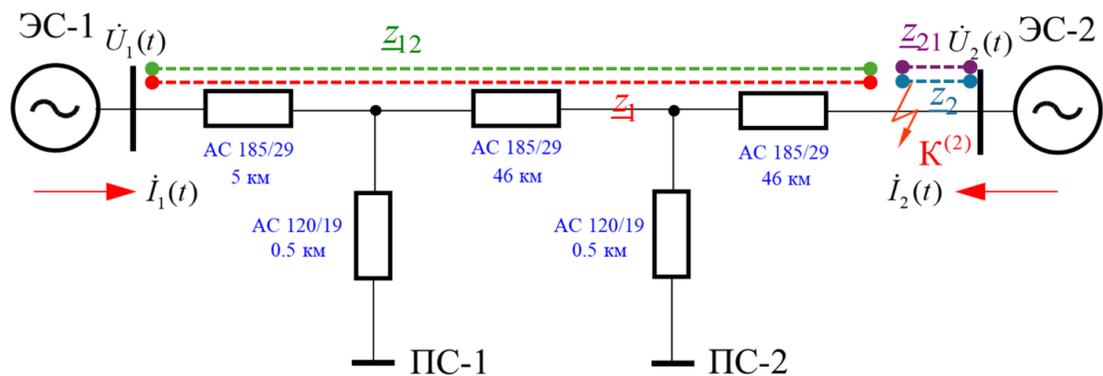


Рис.19 – Структурная схема сети (пример № 2)

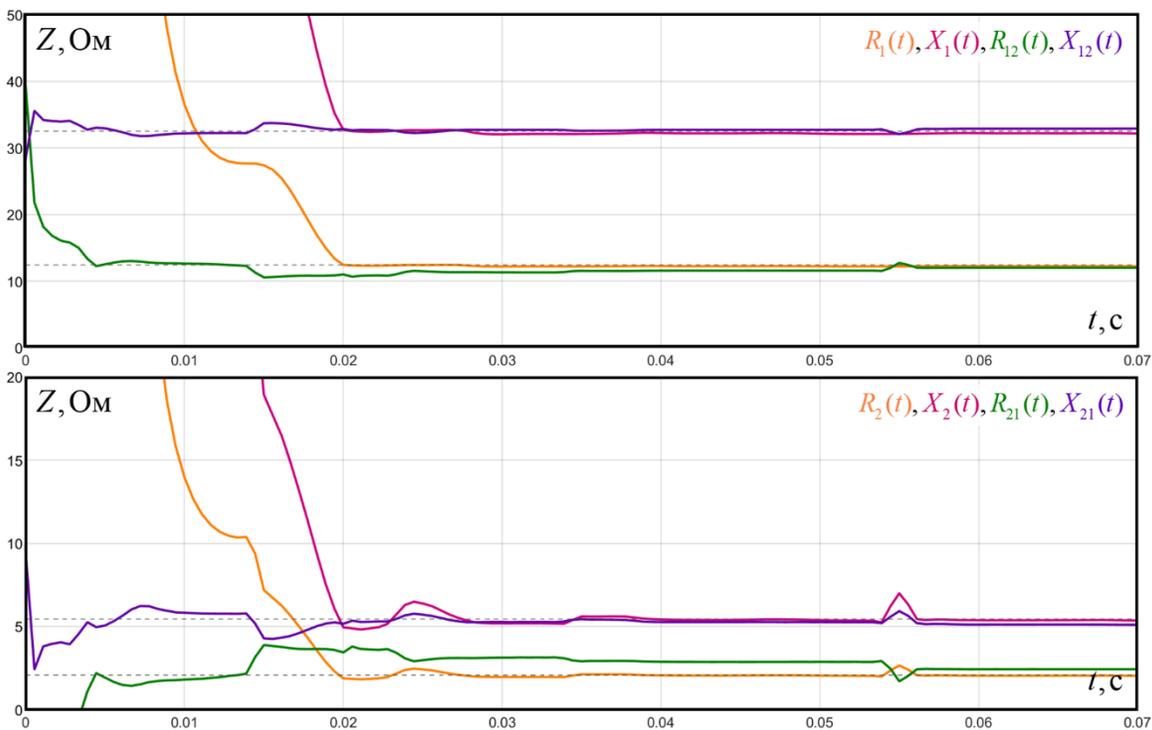


Рис.21 – Оценка сопротивления на основе СВИ

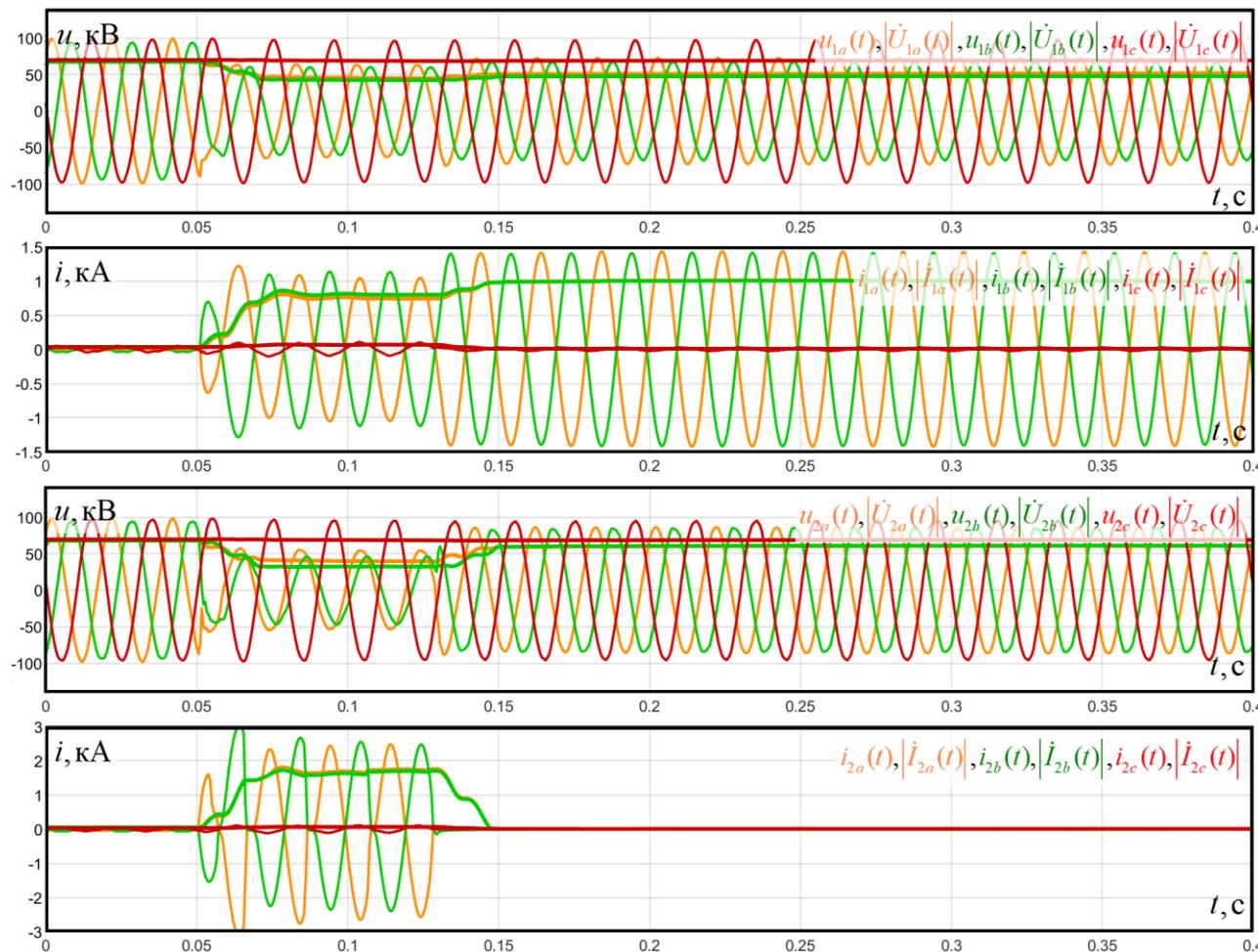


Рис.20 – Осциллограммы напряжений и токов

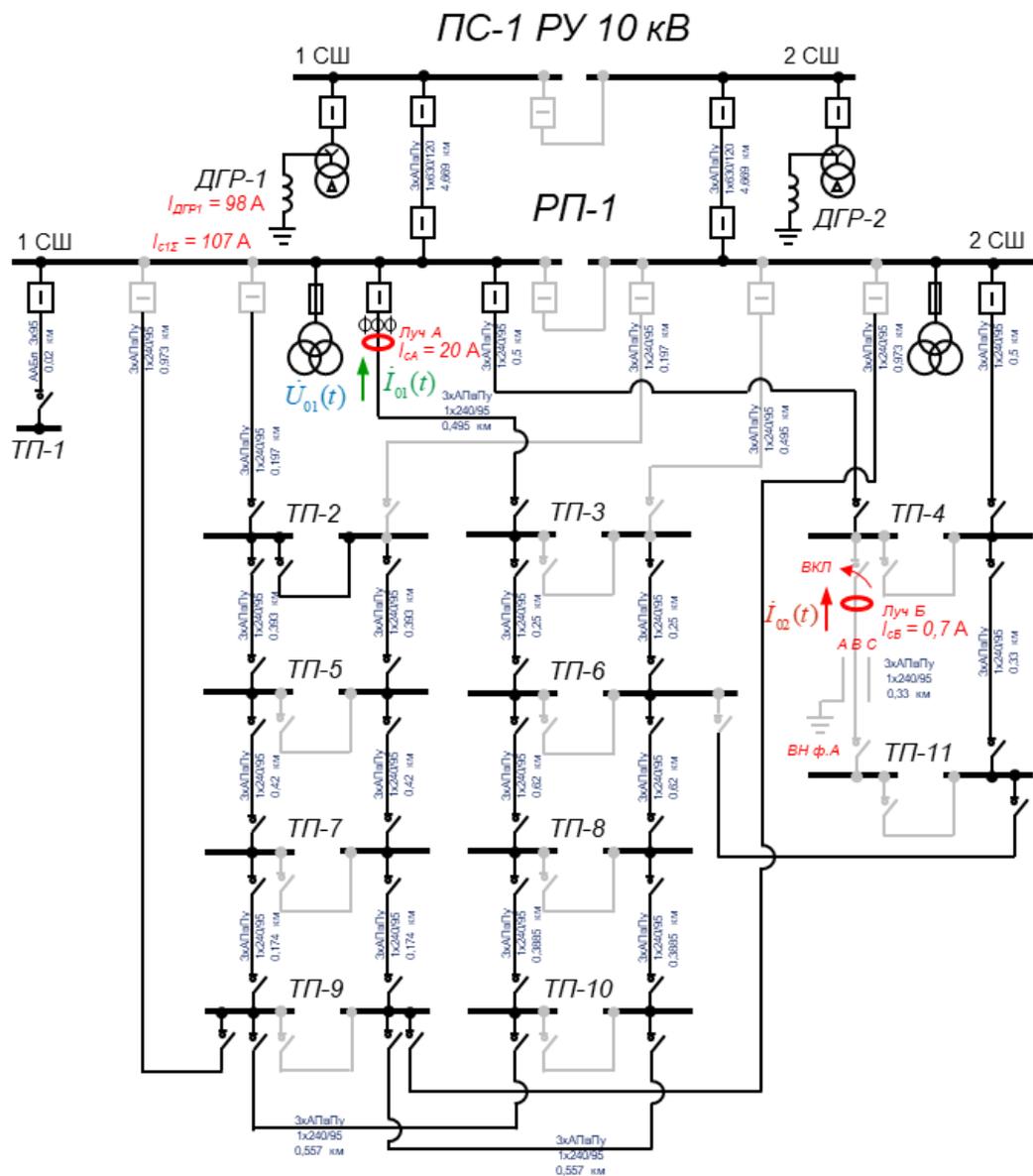


Рис.22 – Структурная схема сети (пример № 3)

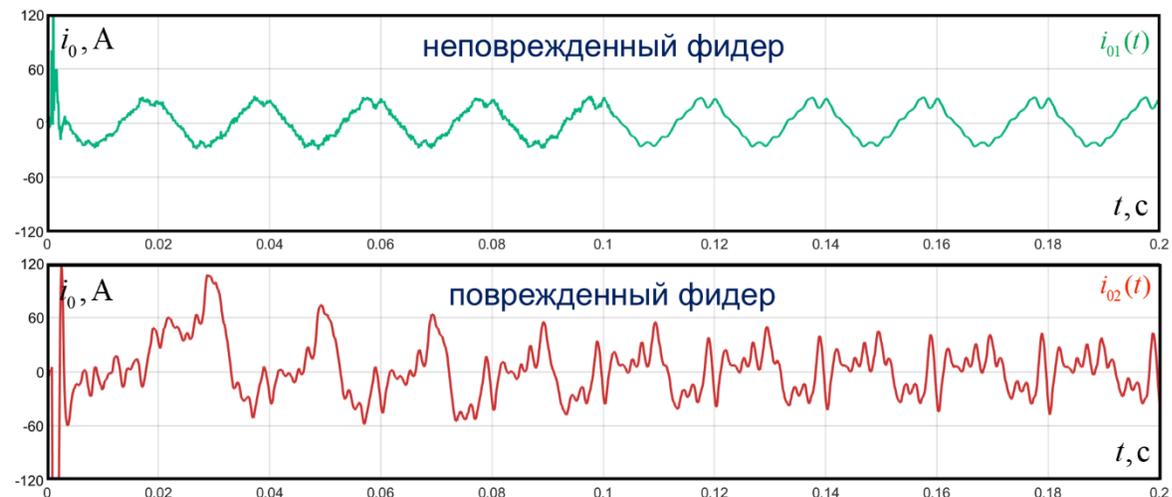


Рис.23 – Осциллограммы токов НП

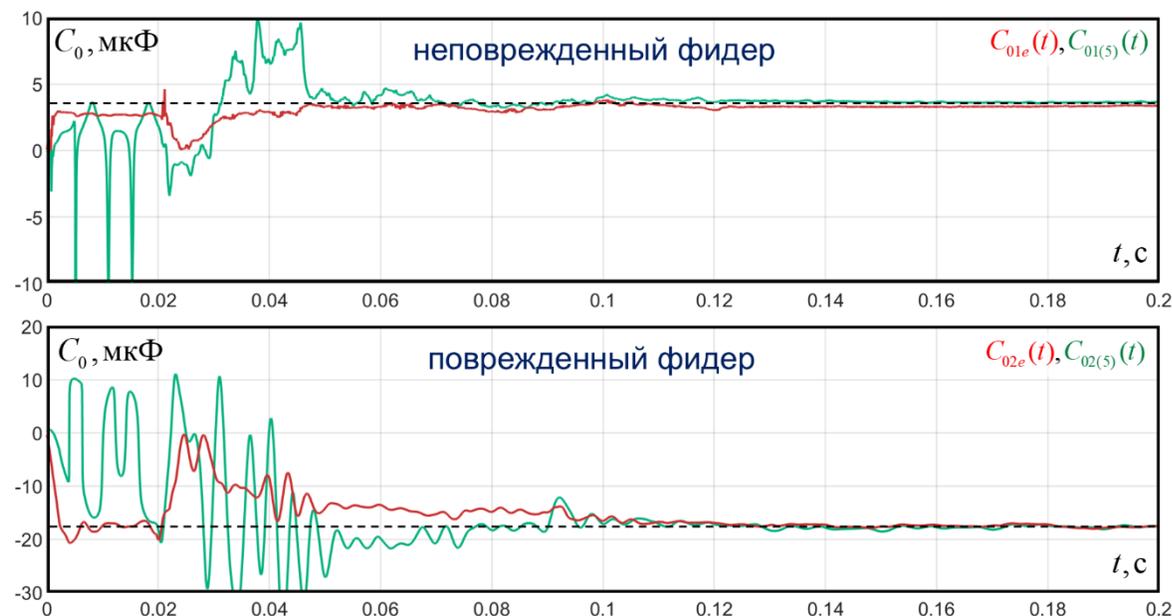


Рис.24 – Оценка емкости фидеров



## Теоретическая значимость работы:

- ❑ составлены математические модели линии для различных режимов, с учетом П-образной схемы замещения, получены уравнения в синхровекторах процесса;
- ❑ разработаны усовершенствованные алгоритмы защиты линии на основе измерений синхровекторов напряжения и тока;
- ❑ проведено математическое и физическое моделирование различных аварийных процессов в линии, в т.ч. при изменении параметров линии и при наличии э/м и э/мех переходных процессов в энергосистеме.

## Практическая значимость работы:

- ❑ выполнен анализ работы предложенных алгоритмов защиты на основе СВИ по данным осциллограмм реальных аварийных событий;
- ❑ получен положительный результат, подтверждающий возможность для практического применения разработанных алгоритмов;
- ❑ алгоритмы защиты от ОЗЗ на основе измерений синхровекторов напряжения и тока НП реализованы в коммерчески производимом устройстве ЭНЛЗ.



# VIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

## МОЛОДЕЖНАЯ СЕКЦИЯ

«Современные тенденции развития цифровых систем релейной защиты и автоматики»

### БЛАГОДАРИМ ЗА ВНИМАНИЕ!

**Пискунов Сергей Александрович**

*инженер группы комплексного проектирования*

ООО "Инженерный центр "Энергосервис"

*аспирант кафедры «Электроэнергетика и электротехника»*

Северный (Арктический) федеральный университет

s.piskunov@ens.ru



Каталог

